

# 考虑时延与流量均衡性的广域保护通信迂回路径重构算法

李振兴<sup>1</sup>, 张腾飞<sup>1</sup>, 王欣<sup>2</sup>, 李振华<sup>2</sup>, 徐艳春<sup>2</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 电力系统光纤线路进行检修、改造或因极端情况导致光纤中断时, 会使电力系统通信业务中断。基于剩余完好网络快速构建一条迂回路径可保证广域网通信业务正常进行。以通信总时延最短和流量均衡为最优目标, 寻找广域通信迂回路径。着重考虑需转移的数据流入备选信道后, 对备选信道内数据排队时延的影响。将信道带宽倒数、信道长度和信道利用率三者的加权和作为信道权重指标。在可用迂回路径表下, 以路径总权重最小为寻优目标, 执行改进 Dijkstra 算法选择最优迂回路径。最后通过 OPNET 通信仿真软件对所选最优迂回路径的实时性和流量均衡性进行验证。

**关键词:** 电网通信中断; 迂回信道; 最短时延; 流量均衡; OPNET

## Circuitous communication channel reconstruction of wide area protection considering delay and balance of flow

LI Zhenxing<sup>1</sup>, ZHANG Tengfei<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>2</sup>, LI Zhenhua<sup>2</sup>, XU Yanchun<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid,

China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** When the fiber optic lines of power system are repaired, transformed or destroyed by some emergencies, communication businesses will be suspended. Based on the rest of undamaged network, quickly reconstructing one circuitous path can keep communication businesses of wide area network working. The optimal circuitous path whose delay is shortest and traffic is balanced is searched in this paper. The effect that transferred data caused on the queuing time of alternative channel is considered emphatically. The sum of each channel's bandwidth reciprocal value, length and utilization rate is considered as weighted index of channel. The path's minimum weighted value is the optimal target. The improved Dijkstra algorithm is performed to get the optimal circuitous path in the useful circuitous path chart. Finally, OPNET is used to test the instantaneity and traffic's balance of the chosen optimal path.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477090) and State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (HUST) Open Foundation Projects (No. 2016KF003).

**Key words:** communication interruption; optimal circuitous path; the shortest delay; balanced data flow; OPNET

## 0 引言

电力系统光纤线路运行过程中, 工程人员经常需要检修和改造光纤线路, 此时就得停运待操作线路<sup>[1]</sup>。有时光纤线路也会因突发事件而中断。在这

些情况下, 我们仍期望中断光纤上原先承载的电力系统通信业务能够不间断运行, 实现电力系统持续正常工作。

针对电力系统通信网络存在中断的问题, 已有学者提出了两种解决方案。有学者提出利用无线传感器在两中断节点间搭建无线信道, 传输被中断光纤上的实时业务。但是紧急布置 WSN (Wireless Sensor Network) 节点困难、无线信号易受电磁场的干扰、WSN 供能技术一直存在争议<sup>[2]</sup>。另一种解决

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477090); 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学)开放基金资助项目(2016KF003)。

方案是利用剩余健全网络构建一条迂回通信路径, 用于传输需转移的实时业务。迂回路径往往有很多条, 选择一条最优的迂回路径是许多学者研究的关键点。观点一采用时延和带宽利用率两个指标, 基于蚁群算法选择最优迂回路径<sup>[3]</sup>, 但是只考虑了网络正常时各信道的时延, 未考虑需转移的数据业务加入备选信道后对备选信道时延造成的影响。观点二提出基于最短信道长度选择最优迂回路径<sup>[4]</sup>, 但是信道长度只是影响通信时延的一个因素, 仅考虑信道长度不足以完整地反映出信道的时延特性。观点三基于可靠性和安全性选择最优迂回路径<sup>[5-6]</sup>, 然而面向类似广域保护等特殊业务对通信时延有着严格的要求<sup>[7]</sup>, 此方案不能满足广域通信快速性的要求。

本文基于实时性和流量均衡性构建最优迂回路径。首先全面分析信道时延的影响因素, 并且考虑转移数据对备选信道排队时延的影响, 构建信道权重指标。然后结合改进 Dijkstra 算法, 提出考虑时延与流量均衡性的广域通信路径重构算法。最后通过 OPNET 通信仿真软件搭建 IEEE14 节点模型对本文所提算法进行验证。

## 1 信道时延与信道指标

### 1.1 广域信道的时延特性

两通信节点间信道  $i$  的时延  $t_{is}$  由发送时延  $t_1$ 、传播时延  $t_2$ 、排队时延  $t_3$  和处理时延  $t_4$  构成。如图 1 所示。

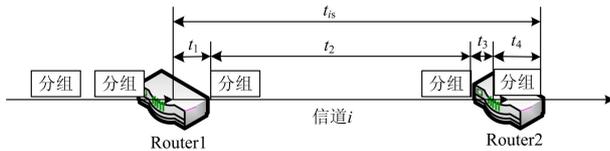


图 1 信道  $i$  的时延构成

Fig. 1 Delay constitution of channel  $i$

发送时延  $t_1$  指将分组由路由器发送到信道上需要的时间, 其计算如式(1)所示,  $l$  为数据帧长,  $B$  为信道带宽。

$$t_1 = l/B \quad (1)$$

传播时延  $t_2$  指电磁波在信道中传播的时间, 其计算如式(2)所示,  $d$  为信道长度,  $v$  为电磁波在信道上的传播速度。

$$t_2 = d/v \quad (2)$$

排队时延  $t_3$  指分组在路由器输入和输出队列里排队等待的时间,  $t_3$  随信道利用率  $u$  增大而增大。

信道利用率  $u$  的计算如式(3)所示,  $T_i$  为信道  $i$

当前吞吐量,  $B$  为信道带宽。

$$u = T_i/B \quad (3)$$

当广域网络信道中断并且中断信道上的数据转移到备选信道  $i$  上时, 承载转移数据的信道  $i$  其利用率  $u'$  变为式(4),  $\Delta T$  为中断信道上需转移的数据流量,  $T_i$  为备选信道  $i$  原有吞吐量。

$$u' = (\Delta T + T_i)/B \quad (4)$$

由式(4)可知, 随着需转移的数据量  $\Delta T$  增加, 承载转移数据的备选信道其利用率线性增加。依据排队论, 当某一信道的利用率增大时, 该信道引起的排队时延会迅速增加。因此, 需转移的数据流入备选信道后, 对备选信道排队时延的影响不可忽略。

在考虑排队时延  $t_3$  时, 预算备选信道流入转移数据后的信道利用率。用该信道利用率反映流入转移数据后, 备选信道的排队时延。考虑流入转移数据后的排队时延  $t_3$ , 使得所选最优迂回路径在流入转移数据后不堵塞。

处理时延  $t_4$  为路由器处理分组需要的时间。

由以上分析可知, 对于广域通信信道, 不同时延部分具有不同的特征:

- (1) 随信道带宽倒数  $1/B$  减小,  $t_1$  减小;
- (2) 随信道长度  $d$  减小,  $t_2$  减小;
- (3) 随着信道利用率  $u$  的减小,  $t_3$  减小。
- (4) 对于固定路由器,  $t_4$  为定值。

### 1.2 信道指标

为了寻找最优迂回路径, 着重考虑  $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  三部分时延。

基于广域信道的时延特性分析, 可以用信道带宽倒数  $1/B$  反映发送时延  $t_1$ , 用信道长度  $d$  反映传播时延  $t_2$ , 用加入转移数据后的信道利用率  $u$  反映排队时延  $t_3$ 。

本文定义  $1/B$ 、 $d$ 、 $u$  的加权和作为信道指标  $\Phi$ , 为备选信道的权重值。

由于  $1/B$ 、 $d$  和  $u$  三者量纲不同, 必须对  $1/B$  和  $d$  进行归一化处理。  $1/B$  和  $d$  归一化公式如式(5)和式(6)。  $u$  已在(0,1)范围内, 故不用对  $u$  归一化处理。

$$1/B_i^1 = \frac{(1/B_i) - (1/B)_{\min}}{(1/B)_{\max} - (1/B)_{\min}} \quad (5)$$

式(5)中:  $1/B_i$  为第  $i$  条信道的带宽倒数;  $1/B_i^1$  为第  $i$  条信道带宽倒数归一化后的值;  $(1/B)_{\max}$  为通信网中信道带宽倒数最大值;  $(1/B)_{\min}$  为通信网中信道带宽倒数最小值。

$$d_i^1 = \frac{d_i - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (6)$$

式(6)中： $d_i$ 为第*i*条信道的长度； $d_i^1$ 为第*i*条信道长度归一化后的值； $d_{\max}$ 为通信网中信道长度最大值； $d_{\min}$ 为通信网中信道长度最小值。

信道*i*权重指标 $\Phi$ 如式(7)所示。

$$\Phi_i = \omega_1 / B_i^1 + \omega_2 \times d_i^1 + \omega_3 \times \mu_i \quad (7)$$

式中： $\Phi_i$ 为通信网络中*i*信道的权重值； $\omega_1$ 为归一化后信道带宽倒数 $1/B_i^1$ 的系数； $\omega_2$ 为归一化后信道长度 $d_i^1$ 的系数； $\omega_3$ 为加入转移数据后信道利用率 $\mu_i$ 的系数。 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 和 $\omega_3$ 为相对值，在不同的目标下， $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 和 $\omega_3$ 的相对大小会发生变化。

## 2 迂回路径优化重构算法

### 2.1 改进 Dijkstra 算法

传统 Dijkstra 算法依据边的长度选择最优路径，以路径总长度最短作为最优目标。

本文将 Dijkstra 算法的选路依据改为信道权重指标 $\Phi$ ，以信道流量均衡下所选迂回路径总时延最短作为 Dijkstra 算法的最优目标。因为 $\Phi$ 综合了影响信道时延的三个因素，可以全面地反映信道时延特性，而且路径 $\Phi$ 的总和越小信道越优，这与原 Dijkstra 算法信道总长越短，信道越优的思路一致。故本文将 Dijkstra 算法的选路依据改为 $\Phi$ 。

为了减少 Dijkstra 算法的工作量，加快算法的执行速度，在执行该算法之前先剔除不能容纳转移数据的信道和加入转移数据后最堵塞的信道。

剔除不能容纳转移流量信道的做法是：判断 $T_{it} + T_{i0} > B_i$ 是否成立，是则剔除第*i*条信道，否则即第*i*条信道可容纳转移流量。 $T_{it}$ 为流入第*i*条信道的转移流量， $T_{i0}$ 为第*i*条信道原有的最大吞吐量， $B_i$ 为第*i*条信道的带宽。

根据式(7)，以信道利用率重权剔除加入转移数据后最可能堵塞的信道。信道利用率重权指的是式(7)中 $\mu_i$ 的系数 $\omega_3$ 大于 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ ，因为信道利用率过大是导致信道堵塞的主因，以信道利用率重权计算的权重值可以反映信道的堵塞情况。此时推荐取 $\omega_1 = 1$ ， $\omega_2 = 1$ ， $\omega_3 = 5$ ，筛选出最大的 $\Phi$ ，该值对应的信道是流入转移数据后最可能堵塞的信道，在迂回路径表中剔除包含该信道的路径。

而在计算用于改进 Dijkstra 算法的信道权重指标时，需根据实际信道总时延中发送时延、传播时

延和排队时延之间的比例，利用式(7)重新获得 $\Phi$ 值。此处推荐取 $\omega_1 = 1$ ， $\omega_2 = 4$ ， $\omega_3 = 1.6$ ，这三个系数值是在 IEEE14 节点广域通信网络仿真模型中，对不同信道三种时延统计得到的。

### 2.2 迂回路径优化重构实现

迂回路径重构的流程如图 2 所示。图 2 中 $\Phi(i)$ 为节点*i*与起点*s*之间信道的权值。 $l(i, j)$ 为节点*i*与节点*j*之间信道的权值。 $\Phi(j)$ 为节点*j*与起点*s*之间信道的权值。节点*i*与*j*是除起点外通信网络中的任意节点。

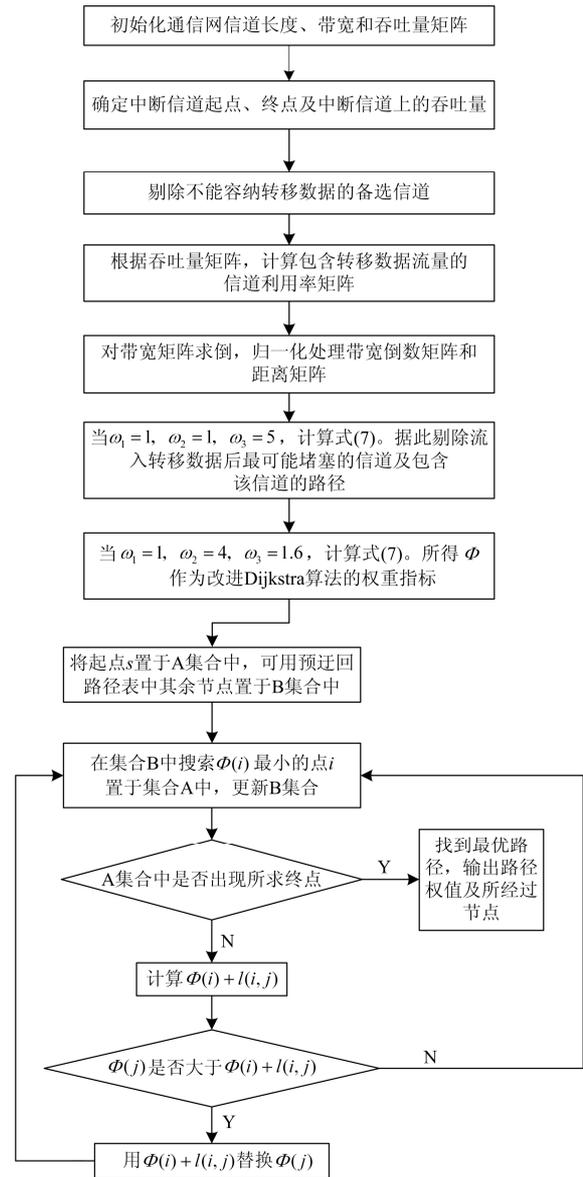


图 2 迂回路径重构流程图

Fig. 2 Flow chart of circuitous communication channel reconstruction

### 3 平台搭建与算法仿真分析

#### 3.1 OPNET 仿真平台构建

本文在 IEEE14 节点上构建通信仿真平台, 设置 LSR2—LSR1 间信道中断, 中断信道上原有 Node2 内的数据流动, 基于最优迂回路径算法选择 Node2 内的数据的最优迂回路径。由 OPNET 搭建的 IEEE14 节点通信仿真模型如图 3 所示。

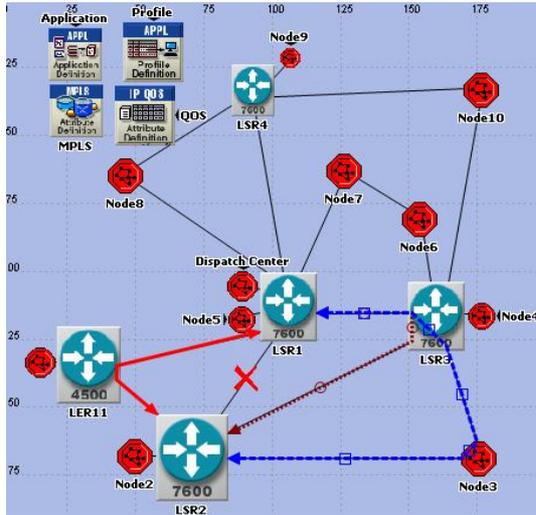


图 3 IEEE14 节点广域通信网络简化模型

Fig. 3 Model of IEEE 14 nodes communication network

图 3 为集中式结构的广域通信网络。通常, 广域保护系统由站域层、区域电网层、广域电网层三层构成<sup>[8]</sup>。本文仿真中 IEEE14 节点系统范围小, 因此, 只分站域层和广域层两层。周围 10 个子站向 Dispatch Center 上传五类信息, 分别是 IED 发送的 GOOSE 报文, PMU 发送的 SV 报文, 运动终端装置发送的 RTUM 报文, 故障录波装置发送的 FM 报文以及电能计量终端发送的 PM 报文。

本文总共进行了三次仿真。仿真一是为了获取用于最优迂回路径算法的原始参数, 然后执行本文提出的算法选择出最优迂回路径; 仿真二使 Node2 内数据沿着所选的最优迂回路径流动并统计时延; 仿真三让 Node2 内数据自由迂回并统计时延; 通过相应统计时延的对比, 分析所选择最优迂回路径的实时性和流量均衡性。三次仿真按以下步骤进行。

(1) 仿真一: 建立并运行正常情况下 IEEE14 节点通信仿真模型, 获得 IEEE14 节点网络信道带宽矩阵、信道长度矩阵和信道吞吐量矩阵。

根据上述统计数据, 执行本文提出的考虑时延与流量均衡性的广域保护通信迂回路径重构算法。

信道 LSR4—Node8 间带宽仅 2 Mbit/s, 无法容

纳需转移的流量 17.39 Mbit/s, 剔除包含该信道的备选路径。

根据式(7), 以信道利用率重权计算每条信道的权重值, 剔除最可能堵塞的信道。因为信道利用率过大是导致信道堵塞的主因, 以信道利用率重权计算的权重值可以反映信道的堵塞情况。即: 当  $\omega_1=1$ ,  $\omega_2=1$ ,  $\omega_3=5$  时, 计算  $\Phi$  值。 $\Phi$  值最大的信道即为最可能堵塞的信道, 剔除包含该信道的迂回路径。以图 3 为例, 每个信道权重值  $\Phi_i$  见表 1。

表 1 每个信道的权重值

Table 1 Weighted value of every channel

信道	$\Phi_i$	信道	$\Phi_i$
LSR2-Node1	3.141 5	Node6-Node7	2.761 5
Node1-LSR1	5.211	Node7-LSR1	4.822 6
LSR2-Node3	3.767	LSR3-Node10	3.276 1
Node3-LSR3	5.409 2	Node10-Node9	3.209 5
LSR3-LSR1	3.808 2	Node9-LSR1	1.835 7
LSR3-Node6	2.808 6	LSR2-LSR3	1.637 6

由表 1 可知: 信道 Node3—LSR3 的权重值最大, 为 5.409 2, 因此该信道是流入转移数据后, 最可能堵塞的信道, 需提前剔除包含该信道的迂回路径。假设转移数据流入信道 Node3—LSR3, 经计算其信道利用率可达到 81.83%, 即该信道吞吐量过大。若此时路由器转发速率不能满足数据到达速率, 缓存队列溢出, 极易出现严重堵塞, 丢包。其他信道的信道利用率在假设流入转移数据后, 基本在 75% 以下, 可满足迂回传输要求。

在剔除了不能容纳转移数据的信道以及最可能堵塞的信道之后, 根据实际信道总时延中发送时延、传播时延和排队时延之间的比例关系, 利用式(7)重新计算可用信道的  $\Phi$  值。执行改进 Dijkstra 算法, 选择最优迂回路径。表 2 列举了所有可用迂回路径的总权值。

表 2 可用备选路径总权值

Table 2 Sum weighted value of usable alternative paths

可用备选路径	路径总权重值
LSR2-Node1-LSR1	8.206 7
LSR2-LSR3-LSR1	6.468 9
LSR2-LSR3-Node6-Node7-LSR1	10.773 8
LSR2-LSR3-Node10-Node9-LSR1	14.167 9

由表 2 可知, 可用备选路径中, 总权重最小的路径为 LSR2—LSR3—LSR1, 其总权值为: 6.468 9, 即该路径是本算法选择出的最优迂回路径。

因为提前剔除了无法容纳转移数据的信道和最可能堵塞的信道, 减少了改进 Dijkstra 算法的搜寻工作

量, 加快了选择最优路径算法的执行速度。

(2) 仿真二: 在仿真一的基础上, 使 LSR2—LSR1 间信道中断, 运用 MPLS 流量工程技术<sup>[9-11]</sup>, 控制 Node2 的数据沿着本文算法所选择出的最优路径 LSR2—LSR3—LSR1 流动, 统计 Node2 和 Node4 内数据的通信时延。

(3) 仿真三: 在仿真一的基础上, 使 LSR2—LSR1 间信道中断, 不采取任何措施, 让 Node2 的数据自由迂回, 分析 Node2 内数据流动方向, 收集 Node2 内数据通信时延。

统计仿真三中 Node2 三条出线上的流量, 发现 Node2 内的数据沿着 LSR2—Node1—LSR1 迂回传输, 该路径不是本算法所选择出的最优路径。

### 3.2 最优迂回路径时延分析

收集仿真二、三中, Node2 内数据的单端时延平均值和最大值, 以及时延抖动平均值和最大值, 如表 3 和表 4 所示。

表 3 GOOSE 和 SV 的单端时延和时延抖动

Table 3 End-to-end delay and delay variation of GOOSE

序号	参数	GOOSE/ms	SV/ms
仿真二	最大时延	0.969	0.984
	平均时延	0.96	0.98
	最大时延抖动	$9.78 \times 10^{-3}$	$3.96 \times 10^{-3}$
	平均时延抖动	$9.76 \times 10^{-3}$	$3.91 \times 10^{-3}$
仿真三	最大时延	1.13	1.14
	平均时延	1.09	1.12
	最大时延抖动	$2.81 \times 10^{-2}$	$1.95 \times 10^{-2}$
	平均时延抖动	$2.77 \times 10^{-2}$	$1.91 \times 10^{-2}$

表 4 RTUM, FM 和 PM 的单端时延和时延抖动

Table 4 End-to-end delay and delay variation of RTUM, FM and PM

序号	参数	RTUM/ms	FM/ms	PM/ms
仿真二	最大时延	1.01	1.02	0.99
	平均时延	0.94	0.95	0.93
	最大时延抖动	$6.94 \times 10^{-2}$	$6.94 \times 10^{-2}$	$6.52 \times 10^{-2}$
	平均时延抖动	$6.42 \times 10^{-2}$	$6.42 \times 10^{-2}$	$6.4 \times 10^{-2}$
仿真三	最大时延	1.14	1.15	1.17
	平均时延	1.05	1.06	1.09
	最大时延抖动	$9.46 \times 10^{-2}$	$9.46 \times 10^{-2}$	$7.87 \times 10^{-2}$
	平均时延抖动	$9.43 \times 10^{-2}$	$9.42 \times 10^{-2}$	$7.68 \times 10^{-2}$

单端时延指的是数据从子站内发出到调度中心接收到数据经历的时间。时延抖动指的是某类数据在传输过程中单端时延的变化。

由表 3 和表 4 可知, 仿真二中, 五类数据的四个时延值均要小于仿真三。说明依据本算法所选择出的最优路径, 实时性优于 LSR2—Node1—LSR1。

路径 LSR2—Node1—LSR1 是路由器依据内部网关协议 RIP(Routing Information Protocol)或者 OSPF(Open Shortest Path First)选择的迂回路径。RIP 仅以路由器跳数作为选择路径的代价, OSPF 通过信道接口带宽来计算选择路径的代价。而本文将信道带宽倒数、信道长度和信道利用率三者的加权和作为选择路径的代价, 考虑因素更加全面; 信道利用率是备选信道流入转移数据后预算的, 能实际地反映流入转移数据后的排队时延。

### 3.3 最优迂回路径内流量均衡性分析

在通信正常时, Node2 的数据通过 LSR2—LSR1 上传到决策中心, LSR2—LSR3 之间并无数据流动。在 LSR2—LSR1 中断时, Node2 的数据沿着最优迂回路径流动时, 首先就会流经 LSR2—LSR3, 即最优迂回路径利用了闲置的带宽, 提高了通信资源利用率。

表 5 和表 6 为仿真一与仿真二中 Node4 内所有 GOOSE 和 SV 报文单端时延和时延抖动对比。

表 5 GOOSE 报文单端时延和时延抖动

Table 5 End-to-end delay and delay variation of GOOSE

序号	参数	IEDs1:GOOSE/ms	IEDs2:GOOSE/ms
仿真一	最大时延	0.561	0.574
	平均时延	0.544	0.551
	最大时延抖动	$1.7 \times 10^{-2}$	$2.36 \times 10^{-2}$
	平均时延抖动	$1.54 \times 10^{-2}$	$2.34 \times 10^{-2}$
仿真二	最大时延	0.58	0.579
	平均时延	0.555	0.554
	最大时延抖动	$2.49 \times 10^{-2}$	$2.45 \times 10^{-2}$
	平均时延抖动	$2.41 \times 10^{-2}$	$2.38 \times 10^{-2}$

表 6 SV 报文单端时延和时延抖动

Table 6 End-to-end delay and delay variation of SV

序号	参数	PMU1:SV/ms	PMU2:SV/ms
仿真一	最大时延	0.567	0.554
	平均时延	0.552	0.546
	最大时延抖动	$1.54 \times 10^{-2}$	$8.57 \times 10^{-3}$
	平均时延抖动	$1.54 \times 10^{-2}$	$8.56 \times 10^{-3}$
仿真二	最大时延	0.591	0.585
	平均时延	0.571	0.561
	最大时延抖动	$2.07 \times 10^{-2}$	$2.24 \times 10^{-2}$
	平均时延抖动	$1.98 \times 10^{-2}$	$2.2 \times 10^{-2}$

由表 5 和表 6 可知, 仿真二相比于仿真一, Node4 内 PMU1 模块发送 SV 报文时延变化最大, 其最大时延增加 0.024 ms, 增加比例仅为 4%; 平均时延增加 0.019 ms, 增加比例仅为 3%。时延增大幅度有限, 仍满足广域通信实时性要求, 说明依据本算法所选信道 LSR3—LSR1 段未堵塞。因为算法预先考虑了

转移数据流入备选信道后对备选信道排队时延的影响, 执行算法时, 可优先选择流入转移数据后仍不堵塞的信道, 最终使所选择的最优路径在加入转移数据后, 流量较为均衡。

#### 4 结论

光纤线路因各种原因中断时, 我们仍期望中断光纤上原先承载的电力系统通信业务能够不间断运行。本文综合影响信道时延的三个因素, 并着重考虑转移业务对备选信道时延的影响, 提出考虑时延与流量均衡性的广域通信迂回路径重构算法, 使中断光纤上原先承载的电力系统通信业务在最优迂回路径上实现不间断传输。

但是, 当中断光纤上承载的电力系统通信业务非常繁重时, 本算法将很难同时保证实时性和流量的均衡性。使繁重的通信业务分流迂回或者减少部分非实时性业务的传输, 以兼顾实时性和流量均衡性是下一步研究的方向。

#### 附录

1) IEEE14 节点信道长度矩阵  $J$  见式(8), 长度单位为 km;

2) IEEE14 节点信道带宽矩阵  $D$  见式(9), 带宽单位为 Mbit/s;

3) 通信正常情况下, 统计得到的 IEEE14 节点信道吞吐量矩阵  $L$  见式(10), 吞吐量单位为 Mbit/s。

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 60.1 & 0 & 0 & 86.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 60.1 & 0 & 104.8 & 103.8 & 66.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 104.8 & 0 & 55.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 103.8 & 55.0 & 0 & 54.2 & 35.7 & 0 & 0 & 0 & 69.8 \\ 86.7 & 66.0 & 0 & 54.2 & 0 & 0 & 54.3 & 76.5 & 80.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 35.7 & 0 & 0 & 32.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 54.3 & 32.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 76.5 & 0 & 0 & 0 & 56.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 80.7 & 0 & 0 & 56.4 & 0 & 65.0 \\ 0 & 0 & 0 & 69.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 65.0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 49.36 & 0 & 0 & 49.36 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 49.36 & 0 & 49.36 & 148.61 & 148.61 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 49.36 & 0 & 49.36 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 148.61 & 49.36 & 0 & 148.61 & 49.36 & 0 & 0 & 0 & 49.36 \\ 49.36 & 148.61 & 0 & 148.61 & 0 & 0 & 49.36 & 49.36 & 148.61 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 49.36 & 0 & 0 & 49.36 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 49.36 & 49.36 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 49.36 & 0 & 0 & 0 & 2.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 148.61 & 0 & 0 & 2.0 & 0 & 49.36 \\ 0 & 0 & 0 & 49.36 & 0 & 0 & 0 & 0 & 49.36 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 17.38 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.058 & 0 & 17.39 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 23 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 86.93 & 0.056 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.06 & 0.12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.057 & 0.11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17.39 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17.39 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17.38 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17.39 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.059 \\ 0 & 0 & 0 & 17.39 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$



参考文献

[1] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于电力系统广域保护的评述[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 513-520.  
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. Review on wide area protection of electric power system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 513-520.

[2] 刘宝, 尹项根, 李振兴, 等. 基于 WSN 重构广域保护紧急通信通道的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 90-95.  
LIU Bao, YIN Xianggen, LI Zhenxing, et al. Study on communication channel reconstruction based on WSN for wide area protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 90-95.

[3] 陈维莉, 罗毅, 涂光瑜, 等. 基于网络时延在线预估的二级电压紧急控制[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 109-113.  
CHEN Weili, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Urgent secondary voltage control based on line evaluation of the network delays[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 109-113.

[4] 鲍晓慧. 基于迂回方式的继电保护信道重构技术[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 23(4): 578-582.  
BAO Xiaohui. The reconstruction technology of protective relaying channel based on circuitous style[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 23(4): 578-582.

[5] 熊小伏, 吴玲燕, 陈星田. 满足广域保护通信可靠性和延时要求的路由选择方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 44-48.  
XIONG Xiaofu, WU Lingyan, CHEN Xingtian. A method of routing selection meeting reliability and the demand of time in WAPC network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 44-48.

[6] 高会生, 王慧芳. 基于安全性的继电保护光纤迂回通道路径选择[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 25-31.  
GAO Huisheng, WANG Huifang. Path selection based on security measure for relay protection services of fiber circuitous channel[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 25-31.

[7] BEGOVIC, MIROSLAV. Wide-area Protection and its application[R]. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2006: 1388-1397.

[8] 刘育权, 华煌圣, 李力, 等. 多层次的广域保护控制体系架构研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 112-122. LIU Yuquan, HUA Huangsheng, LI Li, et al. Research and application of multi-level wide-area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 112-122.

[9] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于 MPLS 的广域保护通信系统路由算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 257-263. XIONG Xiaoping, TAN Jiancheng, LIN Xiangning. Routing algorithm for communication system in wide-area protection based on MPLS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 257-263.

[10] 张新昌, 张项安. 层次化保护控制系统及其网络通信技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 129-133. ZHANG Xinchang, ZHANG Xiangan. Research of hierarchical protection and control system and its communication technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 129-133.

[11] 刘玮, 王海柱, 张延旭. 智能变电站过程层网络报文特性分析与通信配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 110-115. LIU Wei, WANG Haizhu, ZHANG Yanxu. Study on message characteristics and communication configuration of process layer network of intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 110-115.

收稿日期: 2015-09-02; 修回日期: 2015-11-03

作者简介:

李振兴(1977-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制; E-mail: lzx2007001@163.com

张腾飞(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制; E-mail: ztf20110621@163.com

王欣(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制。E-mail: 18829758@qq.com

(编辑 魏小丽)